

PENGONTROLAN (POSISI) MOTOR SERVO AC DENGAN METODA PENGATURAN “VOLT/HERTZ”

Syarkawi Syamsuddin^{*)}, Refdinal Nazir^{**)}, Surya Saputra^{***)}

^{*)}Laboratorium Kontrol Digital, Jurusan Teknik Elektro Unand

^{**)}Laboratorium KBK Konversi Energi Listrik, Jurusan Teknik Elektro Unand

^{***)}Alumni Jurusan Teknik Elektro Unand

ABSTRAK

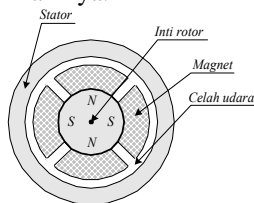
Salah satu aplikasi Motor Servo Ac adalah untuk mengontrol posisi beban. Pengontrolan posisi beban dapat dilakukan dengan menerapkan konsep pengaturan kecepatan menurut metoda “Volt/Hertz”. Dengan metoda ini, kita dapat mengatur kecepatan motor untuk setiap posisi yang diinginkan. Kecepatan motor dapat divariasikan dengan mengatur frekuensi dari power suplay. Agar motor dapat menghasilkan torka yang sama untuk setiap perubahan nilai kecepatan maka tagangan suplay motor juga perlu diatur mengikuti perubahan frekuensi tersebut. Suatu rangkaian penggerak (driver), yang terdiri dari PWM Driver dan Inverter 3-fasa dengan tegangan dan frekuensi dapat diatur (VVVF- Inverter), diperlukan sebagai penyuplay daya motor. Motor dan rangkaian driver dikendalikan oleh suatu unit kontroler (komputer) yang memproses variabel-variabel kontrol (kecepatan, tegangan dan frekuensi). Objek pengontrolan dalam penelitian ini adalah Motor Sinkron Magnet Permanen (type RS-14B-6002C, produksi Harmonic drives, Inc.). Komputer (dengan aplikasi bahasa pemrograman Turbo C) digunakan sebagai kontroler yang mengendalikan aksi pengontrolan terhadap rangkaian driver dan motor. Aksi pengontrolan terhadap motor dilakukan dengan teknik kontrol dua posisi (On-Off Control) dan “Proportional plus Integral Control” (P.I Control)

1. PENDAHULUAN

Motor Servo merupakan motor yang digunakan sebagai sumber bergerak dalam sistem servo, dengan umpan balik (*feedback*) berupa posisi dan kecepatan untuk setiap aksi pengontrolan. Motor Servo dapat bekerja dengan tepat mengikuti instruksi yang diberikan, meliputi posisi dan kecepatan dengan karakteristik sebagai berikut :

- Berputar dengan mantap pada daerah kecepatan yang diberikan.
- Mengubah kecepatan dengan cepat, dan membangkitkan torka yang besar dari ukuran yang kecil.

Motor Sinkron Magnet Permanen merupakan salah satu tipe Motor Servo Ac yang memiliki performansi terbaik dibandingkan tipe Motor Servo lainnya. Disamping efisiensi yang tinggi dan torka yang besar, motor ini juga memiliki kerapatan daya yang besar. Oleh karena itu, motor ini banyak dipakai dalam industri robot, *aerospace actuator* dan penggerak listrik lainnya.



Gambar 1 Konstruksi Motor Sinkron Magnet Permanen

Secara umum material magnetik *rare earth* seperti *Samarium-Cobalt (SmCo)* dan *Neodymium-iron-Boron (NdFeB)* paling memenuhi persyaratan

untuk motor sinkron magnet permanen karena memiliki sifat kerapatan fluks dan gaya paksaan yang tinggi.

Karakteristik Torka

Daya yang diserap oleh motor dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$P_{3\phi} = \frac{3|V_t||E_{fs}|}{X_s} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1)$$

dimana :

$P_{3\phi}$ adalah daya 3-pahasa yang diserap motor.

V_t adalah tegangan terminal motor.

E_{fs} adalah tegangan eksitasi.

δ adalah sudut daya.

$X_s = 2\pi f L_s$ adalah reaktansi sinkron.

Jika rugi-rugi daya pada stator diabaikan dalam analisis berikut ini, maka daya elektromagnetik yang sampai di celah udara adalah sama dengan daya pada terminal motor. Daya pada celah udara merupakan daya yang membangkitkan torka elektromagnetik pada motor. Torka yang dibangkitkan motor adalah :

$$T_m = \frac{P_{3\phi}}{\omega_r} = \frac{3}{\omega_r} \frac{|V_t||E_{fs}|}{X_s} \sin \delta = T_{\max} \sin \delta \quad (2)$$

dimana

$$\omega_r = 2\pi \frac{n_r}{60} \text{ adalah kecepatan sudut rotor,}$$

untuk motor sinkron berlaku :

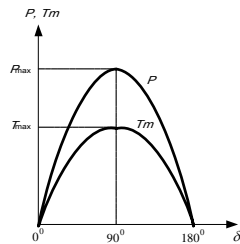
$$n_r = n_{sync} = \frac{120f}{p} \text{ adalah putaran rotor}$$

n_{sync} adalah putaran sinkron.

p adalah jumlah kutub motor.

f adalah frekwensi pasokan motor.

Dari persamaan (2) dapat dilihat bahwa daya dan torka motor merupakan fungsi sinusoidal dari sudut δ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Kurva karakteristik daya, torka dengan sudut daya

Motor dapat diberi beban sampai nilai maksimum P_{max} atau T_{max} , yang dikenal dengan istilah batas kestabilan statis (*static stability limits*). Motor akan kehilangan sinkronisasi apabila δ lebih besar dari 90° . Torka maksimum juga disebut sebagai torka tarikan keluar (*pull-out torque*).

Karakteristik pengaturan Kecepatan

Magnet permanen pada bagian rotor menghasilkan fluks konstan, ϕ_f pada celah udara (*air-gap*). Pada saat rotor berputar dengan suatu kecepatan sudut, ω_r , maka fluks juga berputar dengan kecepatan yang sama. Sehingga fluks terlingkup yang sampai pada belitan stator, ϕ_{fs} , adalah sebagai berikut :

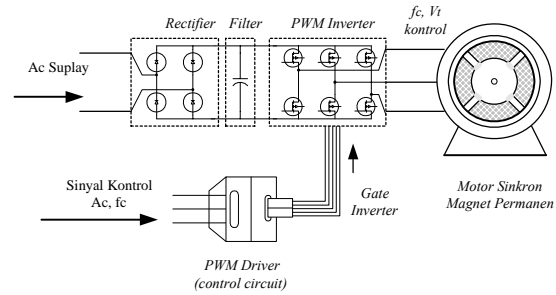
$$\phi_{fs} = \phi_f \sin \omega_r t \quad (3)$$

dimana :

ϕ_{fs} = fluks lingkup pada stator

ϕ_f = fluks konstan pada rotor

Kecepatan rotor dapat dikontrol dengan pengaturan frekuensi dari tegangan suplay. Untuk setiap frekuensi yang tetap akan dihasilkan suatu kecepatan konstan. Jika terjadi penambahan beban, selama penambahan beban tersebut tidak mengakibatkan hilangnya sinkronisasi motor, maka motor tetap berputar pada kecepatan yang konstan. Pengaturan frekuensi dan tegangan suplay motor dapat dilakukan dengan menggunakan PWM Inverter yang berfungsi sebagai konverter ac-ac dengan output frekuensi dan tegangan variabel.



Gambar 3 Sistem pengontrolan loop terbuka motor Sinkron Magnet Permanen

Diagram skematik pengaturan kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan sistem loop terbuka ditunjukkan oleh Gambar 3.

Untuk memperoleh torka maksimum yang sama dalam suatu daerah kecepatan, perubahan frekuensi harus diikuti dengan perubahan amplitudo dari tegangan suplay.

Akibat ada fluks yang berubah terhadap waktu pada kumparan stator maka dibangkitkan tegangan induksi. Besarnya tegangan yang terinduksi (rms) pada belitan stator adalah :

$$E_{fs} = \frac{\omega_r N_s}{\sqrt{2}} \phi_f = \frac{4\pi N_s \phi_f}{p\sqrt{2}} f \quad (4)$$

atau

$$E_{fs} = K_E f \quad (5)$$

dimana

$K_E = \frac{4\pi N_s \phi_f}{p\sqrt{2}}$ adalah konstanta tegangan *emf* terhadap frekuensi.

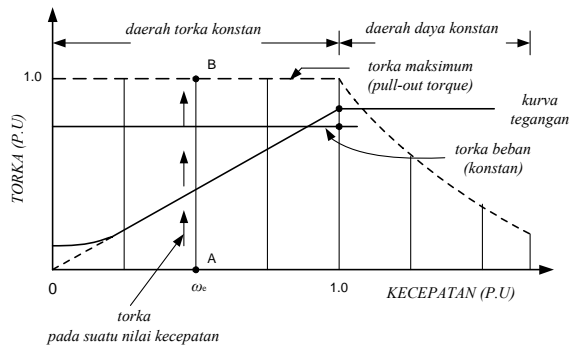
Dari persamaan (2) dan (4), diperoleh hubungan :

$$T_m = K_T \frac{V_t}{f} \sin \delta \quad (6)$$

dimana

$$K_T = \frac{3K_E p}{8\pi L_s} \text{ adalah konstanta torka.}$$

Pada kecepatan nominal motor (*rated speed*), dapat ditentukan rasio tegangan terhadap frekuensi sebesar V_t/f . Pada saat motor beroperasi pada kecepatan yang lebih rendah, maka torka maksimum yang dihasilkan motor (*pull-out torque*) dapat dipertahankan sama dengan torka pada kecepatan dasar dengan cara merubah besaran tegangan terhadap perubahan frekuensi, sehingga rasio V_t/f selalu bernilai konstan untuk setiap nilai kecepatan.

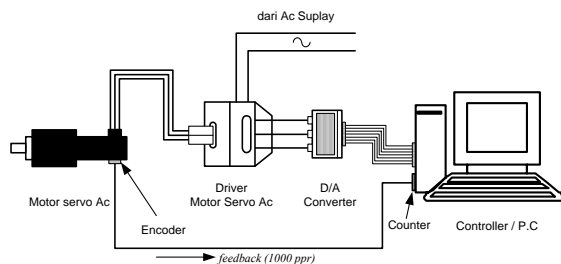


Gambar 4 Karakteristik torka dan kecepatan motor servo Ac

2. RANCANGAN PENGONTROLAN MOTOR SERVO AC

Skemamatic Sistem Pengontrolan

Skema sistem pengontrolan (posisi) Motor Servo Ac, yang diajukan pada tulisan ini, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Skematik pengontrolan (posisi) motor servo AC yang diusulkan

Komputer digunakan sebagai kontroler dengan fungsi :

- Menetapkan posisi referensi motor (*set-point*) dan membaca umpan balik (*feed-back*) berupa posisi aktual.
- Membandingkan hasil pembacaan terhadap referensi sehingga dihasilkan nilai selisih (*error*).
- *Error* posisi akan diproses oleh suatu aplikasi program (*pemodelan teknik pengontrolan dengan Proportional + Integral atau PI controller*), menghasilkan sinyal koreksi atau sinyal kontrol.
- Sinyal kontrol berbentuk gelombang tegangan sinusoidal 3-fasa dengan parameter frekuensi sinus f_c , dan amplitudo tegangan sinus, A_c , dikirim ke rangkaian driver melalui konverter digital-analog (*digital to analog converter, D/A*)

Digital – Analog Konverter (D/A) merupakan konverter yang dikemas dalam bentuk kartu (*card*), berfungsi untuk merubah besaran digital ke bentuk analog. Dalam struktur sistem pengontrolan motor Servo Ac, D/A menjadi perantara atau antar muka komputer terhadap rangkaian driver.

Encoder merupakan peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi posisi poros motor. Setiap perubahan posisi akan dikonversikan ke bentuk pulsa tegangan dengan resolusi tertentu yang dinyatakan dalam pulsa per-revolusi (*ppr*)

Counter berfungsi untuk menterjemahkan jumlah pulsa yang dihasilkan oleh encoder untuk setiap putaran dalam selang waktu tertentu. Data hasil pembacaan counter ini diproses oleh program, dan proses berlangsung seterusnya hingga motor mencapai posisi yang diinginkan. Sama halnya dengan D/A, counter juga berbentuk kartu (*card*) yang dipasang pada *mainboard*.

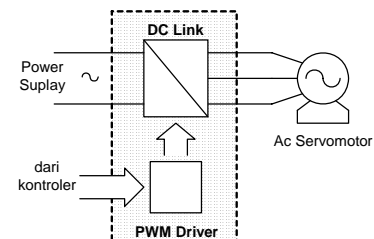
Rangkaian Driver Motor Servo Ac

Rangkaian driver Motor Servo Ac terdiri dari dua bagian utama, yaitu Dc Link dan PWM Generator. Rangkaian driver tersebut berfungsi sebagai:

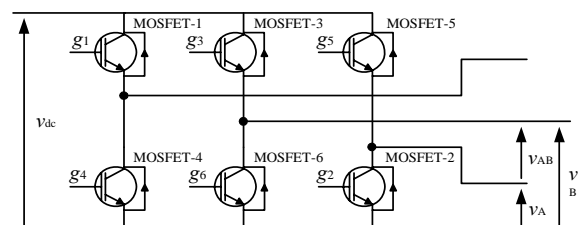
- Pemisah antara sinyal kontrol dan power suplay.
- Memperkuat sinyal kontrol, sehingga sinyal keluaran dari kontroler dapat mengatur aliran daya dari suplay ke motor.
- Membangkitkan sinyal modulasi.

DC LINK

Rangkaian DC Link dari *Rectifier 1-fasa*, *Inverter 3-fasa* dan *Dc filter*. *Rectifier* berfungsi untuk mengkonversi sistem ac 1-fasa menjadi sistem dc. *Dc filter* bekerja untuk mengurangi *ripple* dari sistem dc selama proses penyearahan.



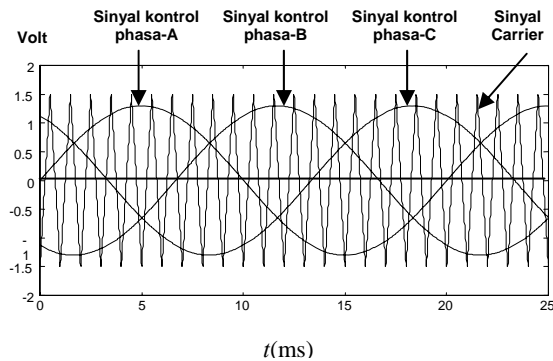
Gambar 6 DC Link dan PWM driver sebagai bagian dari sistem kontrol



Gambar 7 Rangkaian Inverter 3-fasa

Sistem dc dengan tegangan tetap yang dihasilkan oleh rectifier akan dikonversikan oleh inverter jembatan 3 fasa (*three-phase bridge inverter*) menjadi sistem ac 3-fasa dengan tegangan variabel dan frekuensi variabel. Inverter ini

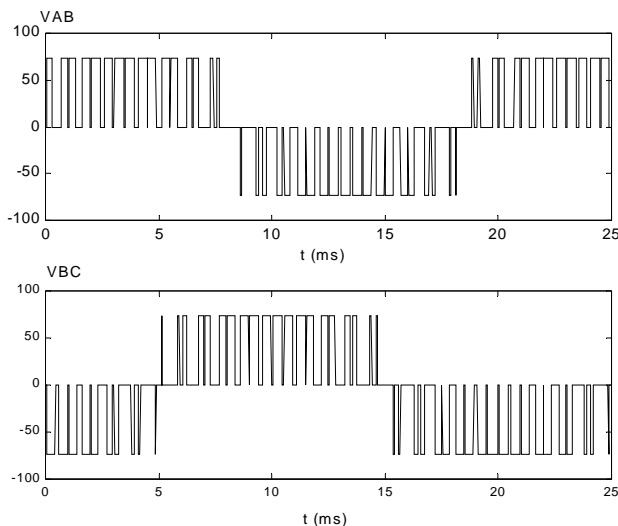
menggunakan metoda *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM), yaitu metoda modulasi lebar pulsa yang menggunakan gelombang sinusoidal sebagai sinyal kontrol dan gelombang segitiga sebagai sinyal carrier, seperti terlihat pada *gambar 8* di bawah ini.



Gambar 8 Sinyal kontrol dan sinyal carrier pada SPWM

Modulasi sinyal berlangsung dengan membandingkan amplitudo sinyal kontrol terhadap amplitudo sinyal carrier. Jika amplitudo sinyal kontrol lebih besar dari amplitudo sinyal carrier, maka amplitudo tegangan output inverter adalah sama dengan nilai tegangan dc, V_{dc} . Sebaliknya, jika amplitudo sinyal kontrol lebih kecil dari amplitudo sinyal carrier maka tegangan output inverter adalah nol.

Sementara itu bentuk tegangan output fasa ke fasa inverter adalah seperti *gambar 9* di bawah ini.

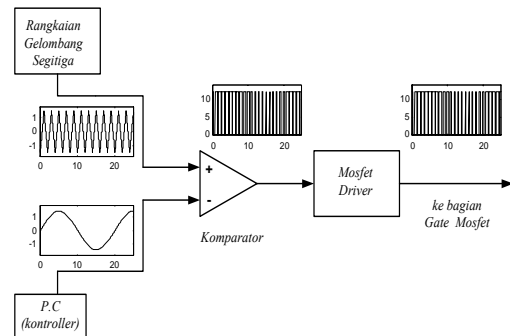


Gambar 9 Tegangan output fasa ke fasa Inverter (VAB dan VBC)

PWM Generator

PWM Generator merupakan bagian dari driver Motor Servo Ac yang membangkit gelombang PWM modulasi. PWM generator terdiri atas 3 elemen, yaitu : Generator sinyal carrier (gelombang segitiga), komparator dan gate driver.

Blok diagram PWM generator untuk pemodulasian salah satu sinyal ditunjukkan pada *Gambar 10*.



Gambar 10 Blok diagram PWM Driver untuk satu modulasi sinyal

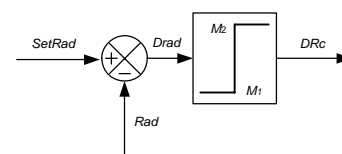
Sinyal kontrol berupa gelombang sinusoidal dibangkitkan dari komputer melalui antar muka digital-analog konverter (D/A), sedangkan sinyal carrier dihasilkan oleh rangkaian pembangkit tersendiri, yaitu rangkaian *pembangkit gelombang segitiga*. Sinyal kontrol dan carrier tersebut diinputkan ke *komparator*. Proses modulasi dilakukan oleh komparator dengan membandingkan tegangan sinyal kontrol dari komputer terhadap sinyal carrier. Output dari komparator adalah sinyal yang telah dimodulasi atau disebut dengan sinyal modulasi. Selanjutnya *Power Mosfet gate driver* akan memperkuat sinyal modulasi ini sehingga dapat menggerakkan Power Mosfet pada inverter.

3. PENGONTROLAN (POSISI) MOTOR SERVO AC

Cara kontroler menghasilkan sinyal kontrol disebut dengan aksi pengontrolan (*control action*). Dalam penelitian ini, digunakan dua macam teknik pengontrolan digital, yaitu : kontroler Dua Posisi (*on-off control*) dan kontroler Proporsional plus Integral (*PI control*).

Aksi Kontrol Dua Posisi (“on-off” controller)

Dalam sistem kontrol dua posisi, aktuator hanya mempunyai dua posisi tetap, yang dalam beberapa hal, benar-benar merupakan posisi “on” dan “off”. Kontrol dua posisi atau “on-off” relatif sederhana dan murah, oleh karenanya banyak digunakan dalam sistem kontrol di industri maupun di rumah-rumah.



Gambar 11 Blok diagram kontroler “on-off”

Dengan aplikasi pada pengontrolan posisi motor (gambar 11), untuk suatu posisi referensi *SetRad*, maka sinyal keluaran kontroler adalah *Drc(t)* dan sinyal kesalahan penggerak (*error*) adalah *Drad(t)*. Pada kontrol dua posisi, sinyal keluaran kontroler *Drc(t)* akan tetap pada harga maksimum atau minimumnya, tergantung pada tanda sinyal kesalahan penggerak *Drad(t)*, positif atau negatif, sedemikian rupa sehingga:

$$Drc(t) = M_1 \text{ untuk } Drad(t) < 0 \quad (8.a)$$

$$Drc(t) = M_2 \text{ untuk } Drad(t) > 0 \quad (8.b)$$

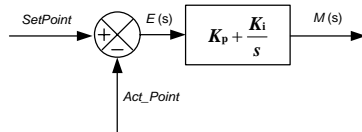
Aksi Kontrol Proporsional Integreal (P.I controller)

Aksi kontrol dari kontroler proporsional plus integral didefinisikan sebagai berikut :

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (9.a)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9.b)$$

Blok diagram aksi kontrol proporsional plus integral adalah seperti pada gambar 12 berikut.



Gambar 12 Blok diagram kontroler Proporsional Integral (PI)

Respon sistem dengan kontroler P.I dapat juga dinyatakan dengan persamaan :

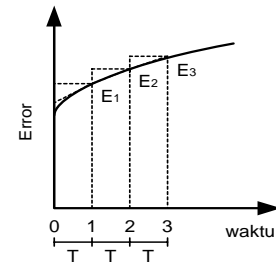
$$\text{Output}_{PI} = K_p E + K_i \sum (E \Delta t) \quad (10)$$

dimana :

Output_{PI} = Output kontroler P.I
 K_p = Konstanta penguatan proporsional
 K_i = Konstanta waktu integral (sama dengan $1/T_i$)

$\sum(E \Delta t)$ = Jumlah total error dari sebelum-sebelumnya (atau luas daerah dibawah kurva error dikalikan waktu)

Persamaan (10) dapat diimplementasikan sebagai kontroler berbasis komputer. Suku pertama dari persamaan kontroler PI, yaitu kontroler proporsional, dimana $K_p E$ langsung dapat diproses untuk setiap *error* yang terjadi. Bagian kedua yaitu kontroler Integrator, $K_i \sum(E \Delta t)$. Proses perhitungan output integrator dilakukan dengan pendekatan trapesium. Kontroler mengambil sampel *error* untuk setiap interval waktu, Δt , seperti pada gambar 13 di bawah ini.



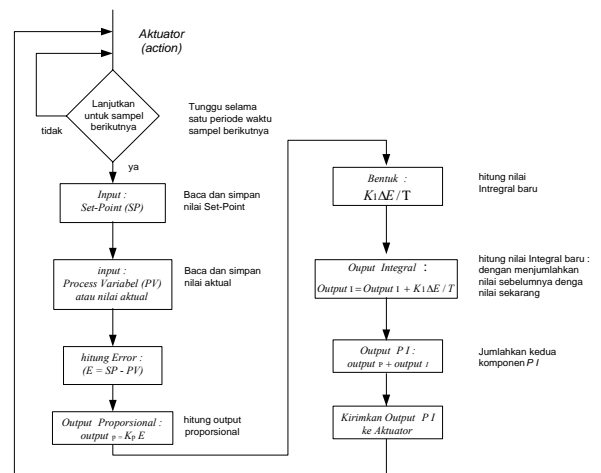
Gambar 13 Output integrator dengan pendekatan trapesium

Output integrator adalah total dari seluruh luas trapesium dan dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$K_i \sum (E \Delta t) = K_i \left(\frac{E_0 + E_1}{2} \right) \Delta t + K_i \left(\frac{E_1 + E_2}{2} \right) \Delta t + \dots + K_i \left(\frac{E_{n-1} + E_n}{2} \right) \Delta t \quad (11)$$

dimana : K_i = Konstanta waktu integral
 E_n = Error saat t_n
 $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ = Interval waktu sampling

Sedangkan untuk kontroler Proporsional plus Integral adalah seperti Gambar 15 berikut :

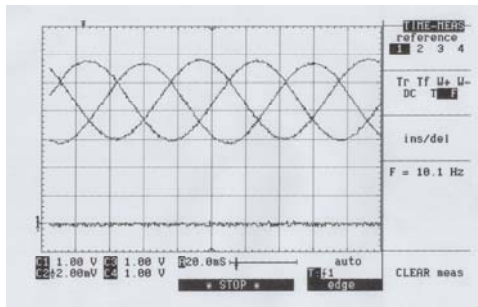


Gambar 14 Algoritma kontroler Proporsional plus Integral

4. HASIL PENGUJIAN RANGKAIAN DRIVER

a. Sinyal Kontrol (tegangan output D/A Converter)

Sinyal kontrol yang dihasilkan dari kontroler melalui perantaraan D/A Converter adalah sebagai berikut :

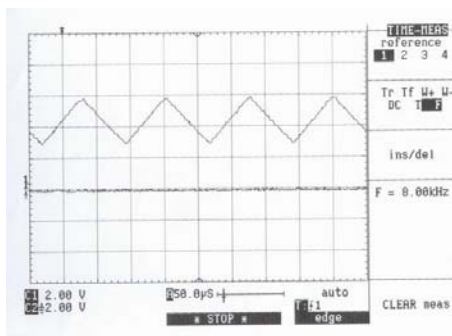


Gambar 16 Sinyal Kontrol (tegangan output D/A)
 $A_c = 1.4$ $f_c = 10.0$ Hz

Dalam penelitian ini, digunakan DAC 12-8L PC produksi CONTEX.

b. Sinyal carrier (Gelombang Segitiga)

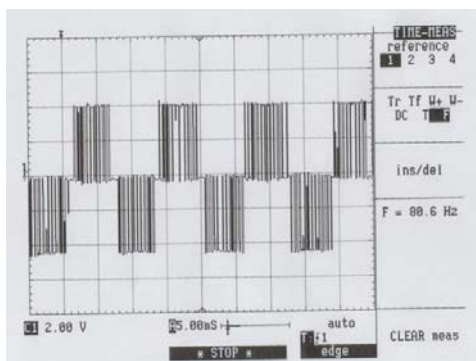
Sinyal carrier merupakan gelombang segitiga yang dihasilkan dari rangkaian pembangkit. Komponen utama dari rangkaian pembangkit adalah ICL 8083 CCPD HO131. Tegangan output generator segitiga adalah sebagai berikut.



Gambar 17 : Sinyal Carrier (gelombang segitiga)
 $A_c = 1.4$ $f_c = 80.0$ KHz

c. Sinyal Gate (pulsa hasil modulasi)

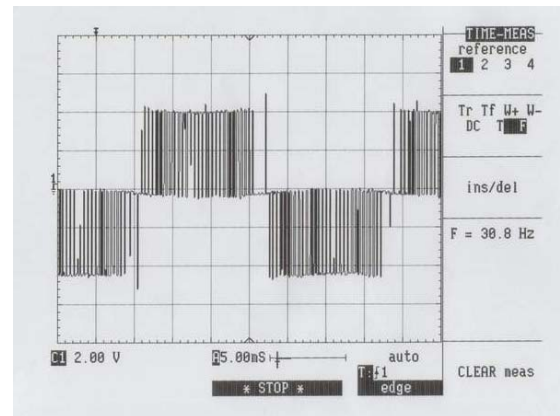
Modulasi sinyal dilakukan oleh komparator (LM 311N) untuk selanjutnya akan diperkuat oleh Power Mosfet Driver (IR 2113). Tegangan output dari IR 2113 inilah yang akan menggerakkan Power Mosfet pada rangkaian inverter.



Gambar 18 Sinyal gate inverter (tegangan output IR 2113)

d. Tegangan Output Inverter

Tegangan Output Inverter memiliki frekuensi yang dapat diatur tergantung perubahan frekuensi dari sinyal kontrol. Sementara itu nilai rms tegangan output Inverter dipengaruhi oleh amplitudo tegangan sinyal Control. Tegangan yang dihasilkan oleh invetrer adalah terlihat di bawah ini.



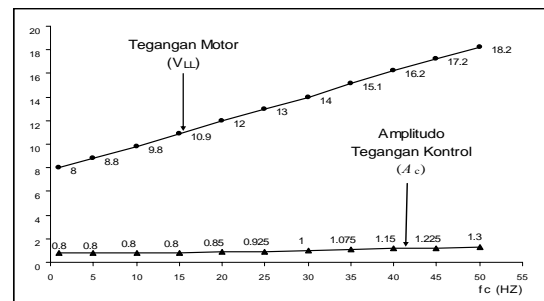
Gambar 19 Tegangan output inverter (V_{LL}) $A_c = 1.4$ $f_c = 50.0$ Hz

PENGUJIAN SISTEM KONTROL

Frekuensi dan Amplitudo Tegangan Sinyal Kontrol

Untuk mencari hubungan antara frekuensi dan tegangan motor, dalam hal ini dinyatakan dengan persamaan A_c terhadap f_c , maka untuk setiap frekuensi input akan ditentukan amplitudo tegangan kontrol yang cocok sehingga arus motor dapat dipertahankan konstan. Dengan mempertahankan arus motor pada nilai yang tetap, maka torka yang dihasilkan motor tidak berubah terhadap variasi frekuensi input atau kecepatan motor.

Dari hasil pengujian diperoleh data karakteristik pengaturan tegangan dan frekuensi motor seperti terlihat pada kurva di bawah ini.



Gambar 20 Kurva karakteristik pengaturan tegangan dan frekuensi

Karena perubahan amplitudo tegangan kontrol relatif konstan, dengan mengambil nilai pengujian pada frekuensi 35 Hz dan 40 Hz maka dapat

dilakukan perhitungan untuk mencari persamaan frekuensi dan amplitudo tegangan kontrol.

$$F_{c1} = 35 \text{ Hz dan } A_{c1} = 1.075 \text{ Volt}$$

$$F_{c2} = 40 \text{ Hz dan } A_{c2} = 1.150 \text{ Volt}$$

Dengan pendekatan persamaan linier,

$$\frac{f_c - f_{c1}}{f_{c2} - f_{c1}} = \frac{A_c - A_{c1}}{A_{c2} - A_{c1}} ; \frac{f_c - 35}{40 - 35} = \frac{A_c - 1.075}{1.15 - 1.075}$$

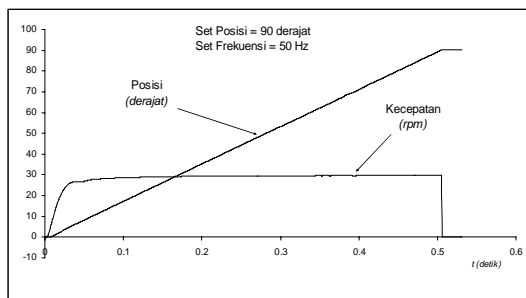
diperoleh persamaan yang menyatakan hubungan Amplitudo tegangan kontrol terhadap frekuensi,

$$A_c = (0.015 * f_c) + 0.55 \quad (12)$$

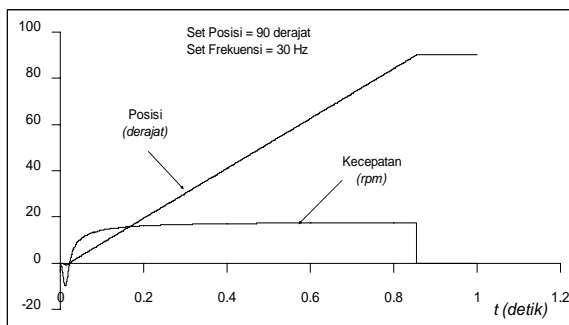
Pengontrolan Posisi dengan “On-Off Control”

Salah satu tujuan pengujian kontrol posisi Motor Servo Ac dengan teknik “On-Off Control” adalah untuk melihat respon kecepatan dan posisi motor terhadap variasi frekuensi input. Disamping itu dapat juga dilakukan pengontrolan posisi dengan tiga model operasi (putaran maju, berhenti dan putaran mundur).

Pengujian dengan Variasi Frekuensi Input



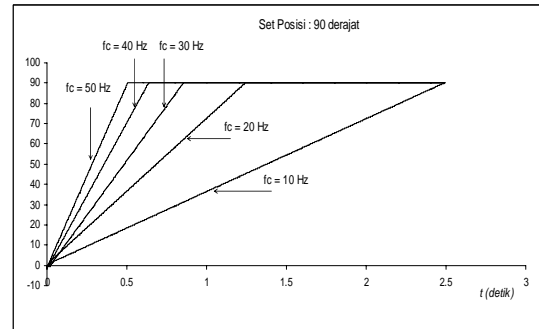
Gambar 21 Kurva posisi dan kecepatan (set point 90° dan 50 Hz)



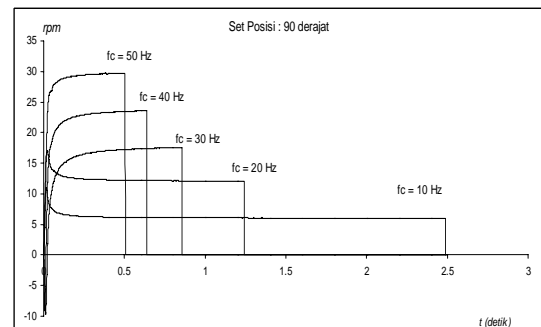
Gambar 22 Kurva posisi dan kecepatan (set point 90° dan 30 Hz)

Dari gambar 21 dan 22 di atas, untuk set posisi yang sama maka kecepatan motor ditentukan oleh besarnya frekuensi yang diinputkan.

Dengan cara yang sama, akan diplot kurva posisi dan kecepatan untuk set posisi 90° dengan variasi frekuensi lainnya.



Gambar 23 Kurva posisi motor terhadap variasi frekuensi input



Gambar 24 Kurva kecepatan terhadap variasi frekuensi input

Secara matematis, persamaan kecepatan motor adalah :

$$Nr = \frac{120f}{p} \quad (\text{tanpa gear})$$

diketahui :

Jumlah kutub motor (p) = 4 dan gear ratio = 50 : 1

maka untuk setiap frekuensi input dapat dihitung kecepatan motor.

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$Nr = \frac{120 * 50}{4 * 50} = 30 \text{ rpm (dengan gear)}$$

Untuk mengetahui performansi sistem pengontrolan, maka data hasil pengujian tersebut dibandingkan terhadap nilai hasil perhitungan secara matematis.

Tabel 1:Perbandingan data aktual terhadap nilai perhitungan (referensi)

input f_c (Hz)	Kecepatan (rpm)			Posisi (derajat)		
	hitung	aktual	deviasi	Set Posisi	aktual	deviasi
50	30	29.72	-0.93%	90°	90.06°	+0.060%
40	24	23.57	-1.77%	90°	90.10°	+0.120%
30	18	17.56	-2.43%	90°	90.09°	+0.100%
20	12	12.08	+0.71%	90°	90.00°	+0.003%
10	6	6.035	+0.50%	90°	90.02°	+0.029%

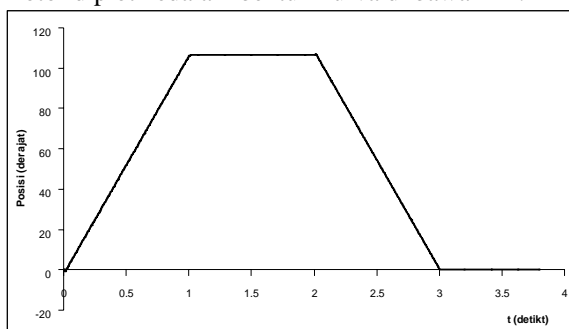
Simpangan kecepatan aktual terhadap nilai ideal (hasil perhitungan) berkisar antara -2.43 % sampai +0.71 %. Sedangkan simpangan posisi aktual terhadap set posisi adalah +0.003% sampai 0.12%.

Perbedaan antara nilai output dan nilai referensi bisa disebabkan karena simpangan frekuensi dari sinyal kontrol. Namun demikian, perbedaan antara set point terhadap nilai aktual (output) tersebut sangat kecil sekali, terutama untuk posisi output. Sehingga secara keseluruhan dapat dianalisis bahwa performansi sistem pengontrolan dengan teknik “On-Off Control” sangat baik karena menghasilkan respon yang akurat.

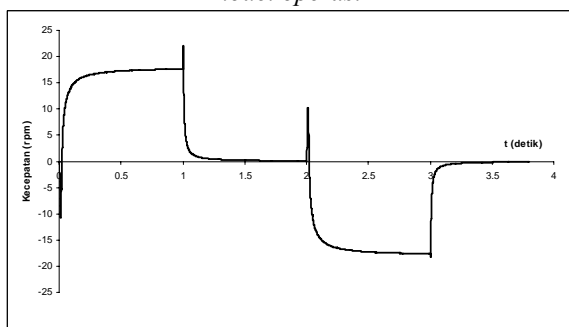
Sementara itu, dari kurva respon kecepatan dapat kita lihat bahwa untuk setiap set posisi yang ditetapkan, kecepatan motor akan stabil sesuai dengan frekuensi yang diinputkan. Dengan teknik “On-Off Control” ini kita dapat mengatur berapa kecepatan motor yang diinginkan untuk mencapai suatu posisi. Dengan kecepatan yang konstan akan dihasil perubahan posisi yang linier terhadap waktu.

Pengujian Pembalikan Putaran Motor

Pengujian II terhadap sistem pengontrolan posisi Motor servo Ac dengan teknik “On-Off Control” bertujuan untuk melihat respon posisi dan kecepatan motor terhadap perubahan arah putaran pada kecepatan tetap. Data posisi dan kecepatan motor diplot kedalam bentuk kurva di bawah ini.



Gambar 25 Kurva respon posisi motor dalam tiga model operasi



Gambar 26 Respon kecepatan motor dalam tiga model operasi

Pembalikan arah putaran motor dilakukan dengan menukar urutan fasa terminal motor, yang dilakukan dengan cara membalikkan persamaan tegangan sinusoidal antara dua fasa pada program, atau dapat juga dilakukan dengan mengalikan nilai frekuensi input dengan (-). Sementara itu agar motor

dapat berhenti, aliran sinyal kontrol dari komputer ditunda dengan cara mengoutputkan tegangan nol pada D/A konverter.

Persamaan tegangan sinusoidal (sinyal kontrol dalam program) untuk arah putaran maju adalah :

$$y_a = A_c \sin(2\pi f_c t)$$

$$y_b = A_c \sin\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$y_c = A_c \sin\left(2\pi f_c t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Dari hasil pengujian dapat kita lihat bahwa pengontrolan posisi Motor Servo Ac dengan teknik “On-Off Control” ini menghasilkan output posisi yang akurat dengan respon yang cepat. Untuk aplikasi sistem yang membutuhkan ketepatan posisi dengan respon yang cepat, maka teknik “On-Off Control” ini dapat digunakan.

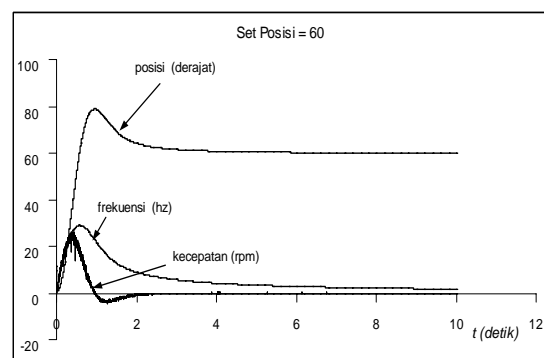
Kelemahan teknik pengontrolan ini adalah kecepatan motor tidak dapat diatur selama proses pencapaian suatu posisi yang diinginkan. Disamping itu, kecepatan motor juga memiliki respon yang sangat kaku karena motor tidak mengalami proses percepatan dan perlambatan selama perputaran mencapai posisi yang ditetapkan. Keadaan ini sangat tidak diinginkan untuk aplikasi sistem yang membutuhkan akselerasi yang halus, terutama apabila motor digunakan untuk menggerakkan suatu beban yang sensitif, dimana keseimbangan perlu dijaga agar tidak terjadi guncangan terhadap beban dan hentakan pada poros motor.

5. PENGONTROLAN POSISI DENGAN TEKNIK “P.I CONTROL”

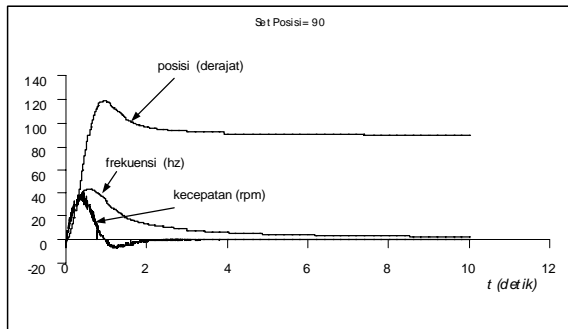
Pengujian sistem pengontrolan posisi dengan teknik “P.I Control” dilakukan terhadap beberapa set posisi untuk mencari konstanta integral dan konstanta proporsional yang cocok sehingga diperoleh output yang diinginkan.

Konstanta Kontroler P.I

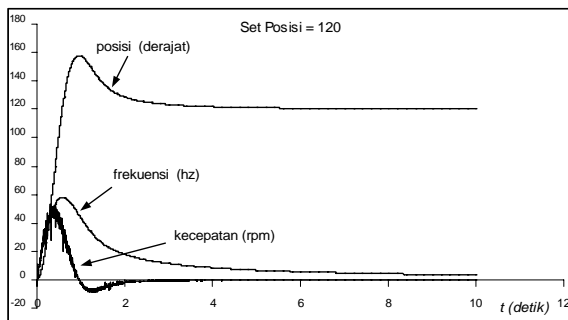
$$K_{p1} : 1.0 \quad K_{i1} : 0.1 \quad K_{p2} : 0.005 \quad K_{i2} : 0.5$$



Gambar 27 Output posisi dan kecepatan motor (set point : 60°)



Gambar 28 Output posisi dan kecepatan motor (set point : 90°)



Gambar 29 Output posisi dan kecepatan motor (set point : 120°)

Dari data hasil pengujian, akan dihitung parameter respon sistem terhadap posisi output, yang terdiri dari : waktu tundaan (t_d), waktu kenaikan (t_r), waktu puncak (t_p) dan waktu penetapan (t_s) serta persentase lewatan maksimum (%OS). Kemudian akan dilihat hubungan antara parameter tersebut terhadap frekuensi motor selama pencapaian posisi yang diinginkan (set posisi).

Dari data pengujian : Set Posisi 90°

▪ Waktu tundaan (t_d)

t_d = waktu saat posisi motor adalah 1/2 dari set posisi

$$= t_{(\text{posisi} = 1/2 \times 900 = 400)} = 0.347 \text{ detik}$$

▪ Waktu kenaikan (t_r)

t_r = waktu saat posisi motor pertama kali mencapai set posisi.

$$= t_{(\text{posisi} = 900)} = 0.547 \text{ detik}$$

▪ Lewatan Maksimum (%OS)

Posisi tertinggi yang dicapai motor = 118.53°

$$\%OS = \frac{118.53^\circ - 90^\circ}{90^\circ} 100\% = 31.7\%$$

▪ Waktu puncak (t_p)

t_p = waktu saat posisi motor mencapai lewatan maksimum.

$$= t_{(\text{posisi} = 118.530)} = 0.953 \text{ detik}$$

▪ Waktu penetapan (t_s)

t_s = waktu saat posisi menetap (stabil) dalam daerah sekitar harga akhir yang ditentukan (2% dari set posisi)

$$\text{Daerah posisi akhir} = 90^\circ \pm (2\% \times 90^\circ) = 90^\circ \pm 1.8^\circ$$

$$t_s = t_{(\text{posisi} = 91.8^\circ)} = 3.428 \text{ detik}$$

▪ Frekuensi Maksimum

Frekuensi tertinggi motor dalam mencapai posisi 90° adalah sebesar 43.88 Hz

Dengan cara yang sama untuk menentukan parameter respon posisi terhadap set posisi 60° dan 120°, maka diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 2 Parameter respon posisi motor

Set Posisi	t_d (detik)	t_r (detik)	t_p (detik)	t_s (detik)	Lewatan maks. (derajat)	%OS	f_c maks (Hz)
120°	0.345	0.574	0.954	3.453	157.740°	31.3°	56.10
90°	0.347	0.574	0.955	3.428	118.533°	31.7°	43.87
60°	0.345	0.574	0.958	3.406	78.815°	30.3°	28.93

Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa parameter respon posisi motor tidak mengalami perubahan untuk setiap set posisi yang ditetapkan. Hal ini disebabkan karena konstanta proporsional dan konstanta integral untuk posisi dan kecepatan yang digunakan adalah sama.

Sedangkan kecepatan tertinggi yang dicapai motor tergantung kepada besarnya nilai set posisi yang ditetapkan. Dengan konstanta $P.I$ yang sama, maka semakin besar nilai set posisi, akan menghasilkan *error* yang besar, sehingga kontroler akan mengoutputkan sinyal koreksi (yaitu frekuensi dan amplitudo tegangan kontrol) yang juga besar yang sebanding dengan nilai *error* tersebut. Output frekuensi dan amplitudo tegangan kontrol ini akan menentukan kecepatan motor.

Konstanta $P.I$ yang digunakan pada pengujian ini dapat menghasilkan respon posisi yang sama untuk setiap set posisi yang ditetapkan dalam daerah kerja sampai 120°. Pembatasan daerah kerja ini perlu dilakukan karena frekuensi tertinggi yang dapat dicapai motor adalah 55-58 Hz, sehingga untuk daerah kerja dengan set posisi yang lebih tinggi, motor tidak akan dapat berputar (tertahan).

Dalam penelitian ini, pengujian sistem pengontrolan posisi dengan " $P.I$ Control" dilakukan hanya untuk daerah kerja 1° sampai 120°. Untuk daerah kerja yang lebih tinggi dari 120°, pengontrolan tetap dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan merubah nilai konstanta $P.I$ atau dengan menggunakan konstanta penguatan umum (*gain*) tanpa harus merubah nilai konstanta $P.I$ yang telah digunakan sebelumnya.

6. KESIMPULAN

Sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, dan berdasarkan hasil yang diperoleh, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Pengontrolan posisi dengan metoda pengaturan "Volt/Hertz" dapat dilakukan dengan mempertahankan arus motor pada suatu nilai yang tetap. Dalam penelitian ini pengontrolan posisi Motor Servo Ac tipe Motor Sinkron Magnet Permanen dilakukan dengan cara mempertahankan arus motor sebesar 0.8 ampere untuk daerah kerja frekuensi 1-58 Hz. Perubahan frekuensi diikuti dengan pengaturan amplitudo tegangan kontrol menurut persamaan :

$$A_c = (0.015 * f_c) + 0.55$$

dengan input Dc Link 32 Vac.

2. Pengontrolan posisi dengan teknik "On-Off Control" dapat menghasilkan respon posisi yang sangat tepat, dan kecepatan respon dapat diset dengan cara menginputkan suatu nilai frekuensi tertentu.
3. Pengontrolan posisi dengan teknik "P.I Control" akan menghasilkan respon posisi dan kecepatan sesuai dengan sinyal kesalahan (error), dimana karakteristik respon motor sangat ditentukan oleh penyetelan konstanta proporsional dan konstanta integral. Sedangkan kecepatan motor dipengaruhi oleh besarnya set posisi yang ditetapkan.

Dalam penelitian ini, untuk daerah kerja frekuensi 1-58 Hz dan daerah penetapan posisi sampai 120°, dihasilkan persentase *overshoot* sebesar 31 % dengan waktu respon untuk kestabilan posisi sebesar 3.45 detik. Konstanta *P.I* yang digunakan adalah:

$$K_{p1}:1.0 \quad K_{i1}:0.1 \quad K_{p2}:0.005 \quad K_{i2}:0.5$$

4. Pengontrolan posisi dan kecepatan Motor servo Ac dengan teknik "On-Off Control" memberikan respon posisi yang sangat akurat dalam waktu yang sangat singkat, tetapi kecepatan motor dalam keadaan tetap untuk mencapai suatu posisi yang diinginkan. Sedangkan pengontrolan posisi dengan teknik "P.I Control" menghasilkan respon yang lebih bagus, karena kecepatan motor dapat diatur selama proses pencapaian posisi referensi. Waktu yang diperlukan motor untuk mencapai stabil pada posisi tertentu lebih lama bila dibandingkan dengan teknik "On-Off Control".

DAFTAR PUSTAKA

1. Kenjo, "Electric Motor and Their Control", Oxford Science, 1991.
2. Excelpoint System (PTE) LTD, "A Tutorial in AC Induction and Synchronous Motors", Analog Device, Singapore, 1999
3. Refdinal Nazir, "Technical Report of Pair Research", Japan, 2002
4. Jacket F. Gieras, Mitchell Wing, "Permanen Magnet Technology" Marcel Dekker Inc, 1997
5. Ogata, Katsuhiko, Ir Edi Laksono, "Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)", Jilid 2, Erlangga
6. Sen, C. Paresh, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley & So, Inc, 1987
7. Killian T. Chrishtopher, "Modern Control Technoligy (Component and System)", West Publishing Company, 1996
8. Pakpahan, S, "Kontrol Automatik (Teori dan Penerapan)", Erlangga, 1987
9. Ogata, Katsuhiko, "Modern Control Engineering", Third Edition, Prentice Hal Inc, 1997
10. Mohan Ned, Tore M. Undeland, William P. Robin, "Power Electronic (Converter, Applications and Design)", Second Edition, John Wiley & Son Inc, 1995
11. Thomas, E. Kissel, "Industrial Electronic", Second Edition, Prentice Hall Inc, 2000
12. Douglas V. Hall, "Microprocessor and Interfacing (Programming and Hardware)", Second Edition, Mc-Grawhill, 1992